

НАБЛЮДЕНИЕ УСИЛЕНИЯ СОЛИТОНОВ ОГИБАЮЩЕЙ СПИНОВЫХ ВОЛН В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ НАКАЧКОЙ

Б.А.Калиникос¹⁾, Н.Г.Ковшиков, М.П.Костылев, П.Кабош*²⁾
К.Е.Паттон*²⁾

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
197376 Санкт-Петербург, Россия

* Colorado State University, Ft. Collins
Colorado, USA

Поступила в редакцию 31 июля 1997 г.

Экспериментально исследовано распространение солитонов огибающей сверхвысокочастотных спиновых волн в пространственно периодическом поле параллельной магнитной накачки. В режиме импульсной накачки с амплитудой, значительно большей порога параметрического возбуждения спин-системы, получено усиление солитонов огибающей спиновых волн, превосходящее величину их естественного затухания.

PACS: 75.30.Ds, 75.40.Gb

В последние годы был выполнен ряд экспериментальных работ, в которых обнаружены и исследованы солитоны огибающей как сильнодисперсионных (дипольно-обменных), так и слабодисперсионных (дипольных) сверхвысокочастотных спиновых волн (СВ), распространяющихся в ферромагнитных пленках (ФП) (см., например, [1-6] и литературу в них). В частности, было установлено, что магнитная диссипация существенно ограничивает время существования солитонов и, таким образом, длину пути их распространения. Даже в случае высококачественных монокристаллических пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ), имеющих рекордно низкие потери, длина односолитонного пути не превышает 1 см [6]. Для увеличения времени существования спин-волновых солитонов необходимо найти способ компенсации их естественного затухания.

Теоретически известно, что для компенсации затухания спиновых волн можно использовать механизмы нелинейного трехволнового и четырехволнового взаимодействий, реализуемых в условиях параллельной и поперечной параметрической накачки. Экспериментальные исследования показали, что с помощью параллельной накачки можно получить усиление линейных спиновых волн в пленках ЖИГ [7,8]. Недавно сообщалось об использовании локальной продольной накачки для компенсации затухания солитонов огибающей СВ [9]. Максимальный коэффициент усиления, достигнутый в [9], составил 0.7 дБ. Настоящая работа направлена на изучение распространения солитонов огибающей СВ в поле пространственно периодической параллельной магнитной накачки с целью получения эффективного усиления солитонов.

Теоретические исследования параметрического усиления солитонов огибающей СВ [10] показывают, что из всех возможных типов спин-волновых солитонов в ФП усиления наиболее легко достичь в случае так называемых обратных объемных спиновых волн (ООСВ). Эти волны распространяются

¹⁾ e-mail: borisk@borisk.usr.etu.spb.ru.

²⁾ P.Kabos, C.E.Patton.

вдоль направления постоянного магнитного поля в касательно намагниченных пленках и имеют отрицательную дисперсию в длинноволновой области спектра. Как было теоретически и экспериментально показано ранее [11], длинные ООСВ имеют низкий порог параметрического возбуждения h_{th} , что обуславливает сравнительную легкость их параметрической регенерации. Кроме того, в силу особенностей дисперсионных и нелинейных свойств ООСВ, сравнительно просто достигается формирование солитонов их огибающей [3,4,6]. Именно поэтому в настоящей работе эксперименты по параметрическому усилению выполнены с солитонами ООСВ.

Для экспериментов использовались образцы в виде узких полос пленок ("волноводов" спиновых волн) шириной 2 мм. Такие волноводы вырезались из монокристаллических пленок ЖИГ толщиной $L = 5.2$ мкм, выращенных на подложке гадолиний-галлиевого граната ориентации (111). Возбуждение и прием спиновых волн осуществлялись с помощью обычной конструкции [1,6], имевшей короткозамкнутые возбуждающую и приемную микрополосковые антенны шириной 50 мкм и длиной, равной ширине пленочного волновода. Расстояние между антеннами было 6.1 мм. Для создания СВЧ поля параллельной магнитной накачки использовались две разновидности периодических микрополосковых структур: синфазная ("решетка") и противофазная ("меандр"). Конструкция "решетка" имела период 0.3 мм и содержала 7 элементов шириной 0.1 мм. Конструкция "меандр" имела период 0.3 мм и содержала 11 элементов шириной 0.1 мм. Каждая из структур накачки поочередно помещалась между антеннами. При этом расстояние от входной антенны до края первого элемента структуры выбиралось равным 3 мм, что обеспечивало формирование одиночного солитона огибающей при подходе волнового пакета к краю структуры. (Обсуждение процесса формирования солитонов ООСВ можно найти в [6].)

Для получения эффективного усиления солитонов использовался импульсный режим накачки. При этом импульс накачки подавался в момент времени, когда спин-волновой солитон подходил к краю накачечной структуры. Такое совмещение солитонного импульса и импульса накачки, согласно теоретическим представлениям [10], позволяет использовать для усиления нестационарный режим, когда даже при больших надкритичностях накачки $h/h_{th} \gg 1$ параметрическое возбуждение паразитных (тепловых) спиновых волн еще не развилось.

Остановимся на экспериментальных данных, полученных при использовании в качестве элемента накачки микрополосковой структуры "решетка". Режим возбуждения и распространения солитонов в отсутствие поля накачки был аналогичен подробно описанному в [6]. Эксперименты выполнялись на несущей частоте сигнала $f_s = 4669$ МГц, что было на 50 МГц ниже частоты однородного ферромагнитного резонанса экспериментального пленочного образца. Расчетное значение несущего волнового вектора составляло $k_s = 110$ рад/см. Частота накачки f_p изменялась вблизи удвоенной частоты сигнала. Наилучший режим усиления солитонов был получен при $f_p/2 - f_s = 5$ МГц.

Эксперименты выполнялись в два этапа. На первом этапе измерялся порог параметрической неустойчивости спин-системы по мощности P_{th} в условиях практически стационарного возбуждения. Для этого на микрополосковую структуру накачки подавались длинные (более 50 мкс) СВЧ импульсы. Порог фиксировался по появлению параметрически генерируемых ООСВ на выходной

антенне на частоте $f_p/2$. На втором этапе исследовались процессы усиления линейных импульсов СВ и спин-волновых солитонов при одновременной подаче f_s и f_p . При этом мощность накачки выбиралась вблизи и выше порогового значения P_{th} .

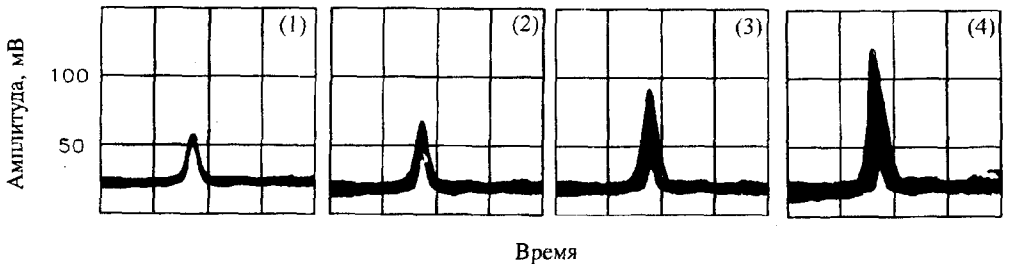


Рис. 1. Осциллограммы огибающей импульсного сигнала на выходной антенне, полученные при различных уровнях мощности накачки: 1 - $P_p/P_{th}=2,5$, 2 - $P_p/P_{th}=128$, 3 - $P_p/P_{th}=155$, 4 - $P_p/P_{th}=251$

На рис.1 представлены характерные осциллограммы, иллюстрирующие процесс усиления солитона огибающей ООСВ. Осциллограммы получены при следующих параметрах: длительность импульса накачки - 100 нс, длительность входного импульса сигнала - 26 нс, длительность солитона - 14 нс. Измеренное время задержки солитона равно 237 нс, что дает его скорость в $2.57 \cdot 10^6$ см/с. Это значение скорости солитона близко к теоретически рассчитываемому значению групповой скорости несущей волны, равному $2.4 \cdot 10^6$ см/с.

Как ясно из осциллограмм, с ростом мощности накачки P_p наблюдается увеличение амплитуды солитона, то есть происходит его усиление. Заметим также, что огибающая усиленных солитонных импульсов выглядит размытой по амплитуде. Вероятно, это явление обусловлено несинхронностью фаз сигнала и накачки.

На рис.2 показаны зависимости коэффициента усиления $G = f(P/P_{th})$, снятые в солитонном и линейном по входному сигналу режимах. Обратим внимание, что коэффициент усиления линейного импульса при тех же значениях мощности накачки P_p значительно больше, чем коэффициент усиления солитона.

Максимальное значение коэффициента усиления солитона составило около 6 дБ. Такая же величина усиления была получена с помощью накачной структуры типа "меандр".

Попытки получить большее значение G за счет увеличения P_p приводили к изменению формы выходного импульса. По-видимому, это соответствовало началу перехода в двухсолитонный режим (по типу, описанному в [4]). Последнее замечание носит предварительный характер и требует детального экспериментального изучения. С позиций же теории, определяющей пороги одно- и многосолитонного режимов в пренебрежении диссипацией (см., например, [12]), следует, что максимальный коэффициент усиления в односолитонном режиме не может превышать 9,6 дБ.

Теория, на основе которой можно было бы дать полное объяснение выполненных экспериментов, в настоящее время не разработана. Для выявления

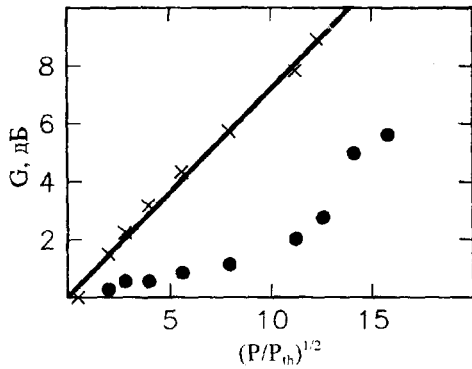


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления линейных спин-волновых импульсов (x) и спин-волновых солитонов (•) от нормированной мощности накачки. Сплошной линией показан результат расчета по данным численного моделирования

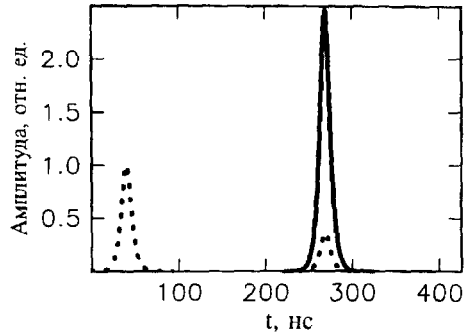


Рис.3. Результаты численного моделирования распространения спин-волнового импульса в пленке ЖИГ. Точечными линиями показаны профили входного и выходного спин-волновых импульсов при отсутствии накачки, а сплошной линией - в присутствии накачки. При моделировании использованы следующие параметры: групповая скорость - $2.57 \cdot 10^6$ см/с, длительность входного импульса - 14 нс, параметр диссипации - $\Delta H = 0.25$ Э, надкритичность - $(P_p/P_{th})^{1/2} = 20$

основных особенностей параметрического усиления импульсов ООСВ импульсами продольной накачки нами было выполнено численное моделирование. В качестве исходных использовались эволюционные уравнения, приведенные в [10]. Для выяснения физики процесса моделировалось два случая: сонаправленного и встречнонаправленного распространений сигнальной и холостой волн. Оказалось, что результаты эксперимента с импульсами линейных волн находят хорошее теоретическое объяснение в том случае, когда импульсы сигнальной и холостой волн распространяются в одну и ту же сторону. Пример результатов численного моделирования показан на рис.3. Для численного моделирования профиль сигнальной волны задавался в виде $\text{sech}[a(t - t_0)]$. Подчеркнем, что все остальные параметры были взяты, как в эксперименте. Точечными линиями на рис.3 показаны профили входного и выходного сигнальных импульсов в отсутствие накачки; сплошной линией показан профиль усиленного спин-волнового импульса. Как ясно из рисунка, теоретически полученная величина усиления превышает естественное затухание спин-волнового импульса.

Рассчитанная по данным численного моделирования зависимость коэффициента усиления $G = f(P_p/P_{th})$ показана на рис. 2 сплошной линией. Нетрудно видеть очень хорошее совпадение между данными эксперимента и расчета.

Сонаправленность распространения сигнальной и холостой волн позволяет интерпретировать их взаимодействие в поле накачки как параметрический процесс вида $k_s + k_i = k_p$, где k_i и k_p - волновые числа холостой волны и волны накачки. Последнее соотношение дает $k_p = 220$ рад/см. Такая величина k_p приводит к $l = 2\pi/k_p \approx 0.029$ см. Именно из этих соображений был выбран период структур накачки, использованных в экспериментах.

Подробное описание экспериментальных результатов будет опубликовано позднее.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 96-02-19515.

-
1. Б.А.Калиникос, Н.Г.Ковшиков, А.Н.Славин, ЖЭТФ **04**, 159 (1983).
 2. B.A.Kalinikos, N.G.Kovshikov, and A.N.Slavin, Phys. Rev. **B42**, 8658 (1990).
 3. M.Chen, M.A.Tsankov, J.M.Nash, and C.E.Patton, Phys. Rev. **B49**, 12 773 (1994).
 4. J.M.Nash, C.E.Patton, and P.Kabos, Phys. Rev. **B51**, 15 079 (1995).
 5. R.Marcelli and P. De Gasperis, IEEE Trans. Mag. **30**, 26 (1994).
 6. N.G.Kovshikov, B.A.Kalinikos, C.E.Patton et al., Phys. Rev. **B544**, 15 210 (1996).
 7. Б.А.Калиникос, М.К.Ковалева, Н.Г.Ковшиков, Изобретения и открытия **26**, 225 (1988).
 8. Г.А.Мелков, С.В.Шолом, ЖТФ **60**, 118 (1990).
 9. A.V.Bagada, G.A.Melkov, A.A.Serga, and A.N.Slavin, *Abstract Rooklet of 41st Conf. on Magnetism and Magnetic Materials*, Atlanta, Georgia USA, November 12-15, 1996, p.162.
 10. B.A.Kalinikos and M.P.Kostylev, *Digests of International Magnetism Conference*, New Orleans, Louisiana USA, 1997, p.AD-10.
 11. Б.А.Калиникос, Н.Г.Ковшиков, Н.В.Кожусь, ФГТ **27**, 2794 (1985).
 12. В.Е.Захаров, С.В.Манаков, С.П.Новиков, Л.П.Питаевский, *Теория солитонов: Метод обратной задачи*, М.: Наука, 1980.